

3D Printing

Testine inkjet sotto la lente

Tramite un sistema di visione con telecamera ad alta velocità vengono filmate le gocce emesse da una comune testina inkjet (a getto di inchiostro), fissata su un apposito carrello. Le immagini acquisite sono elaborate ed analizzate per rilevare le caratteristiche fisiche delle gocce (es. morfologia, velocità), al fine di controllare il funzionamento della testina. L'obiettivo finale del lavoro è di acquisire le informazioni necessarie per sviluppare ed ottimizzare un'applicazione di prototipazione rapida basata sulla tecnica 3DPrinting (3DP)

Viene impiegato un sistema di visione, composto da una telecamera ad alta velocità, per caratterizzare una testina inkjet (a getto di inchiostro) e valutare le proprietà fisiche delle gocce di inchiostro. Il lavoro permette di determinare i parametri necessari ad utilizzare tale testina in applicazioni di prototipazione rapida, basate sulla tecnica 3DPrinting [1]. Con Rapid Prototyping si intende un insieme di tecniche produttive "incrementali" nate negli anni 90 per realizzare prototipi in tempi brevi (direttamente da file CAD). Oggi queste tecniche si stanno diffondendo per produrre piccoli lotti e per ottenere componenti pienamente funzionali, con caratteristiche uguali se non superiori a quelle di processi convenzionali.

Il 3DPrinting (3DP) [2] [3a] [3b] è un processo di fabbricazione a strati, in cui il consolidamento del singolo strato avviene spruzzando un legante (invece dell'inchiostro) da una testina inkjet, su uno strato di materiale in polvere (ceramico, metallico ecc.) come schematizzato in Figura 1.

- 1 - Un rullo deposita uno strato di materiale in polvere;
- 2 - l'ugello spruzza gocce di legante in maniera selettiva nelle zone da agglomerare;
- 3 - il supporto mobile si abbassa per permettere la formazione di un nuovo strato.

Tradizionalmente per stampare legante liquido su polvere è utilizzata la tecnologia Continuous Jet (CJ), che tuttora offre vantaggi se è richiesta una copertura di aree relativamente grandi (produttività). Più recentemente ha guadagnato un crescente interesse la

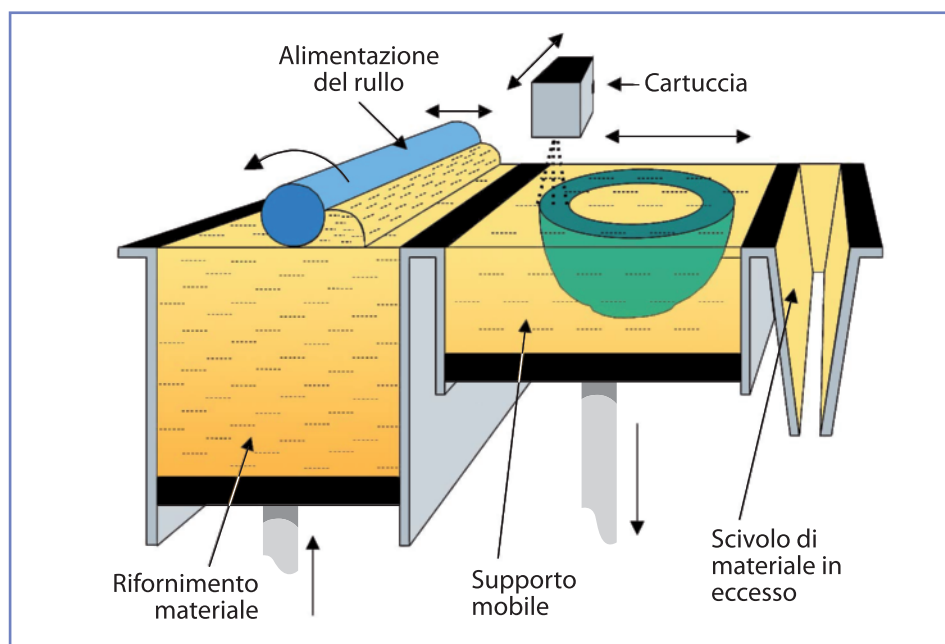


Fig. 1 - Le principali fasi del processo 3DPrinting

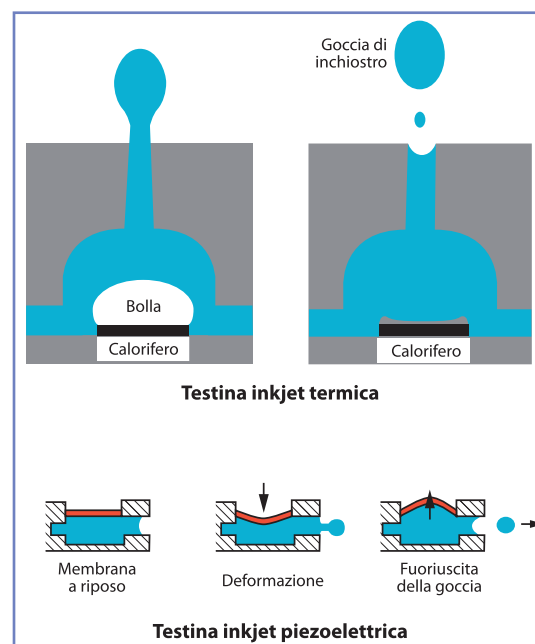


Fig. 2 - Principio di funzionamento di testine inkjet per l'espulsione di una gocciolina

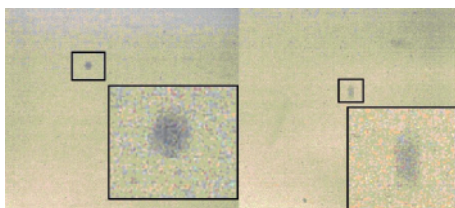


Fig. 3 - Gocce con ingrandimento nel riquadro, al variare della tensione di alimentazione (12 V sinistra e 14 V destra). Con la durata fissata dell'impulso, le gocce hanno una velocità maggiore e una forma più allungata all'aumentare della tensione

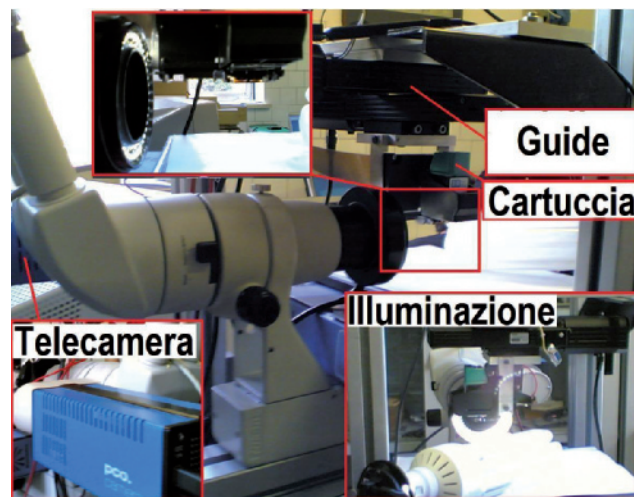
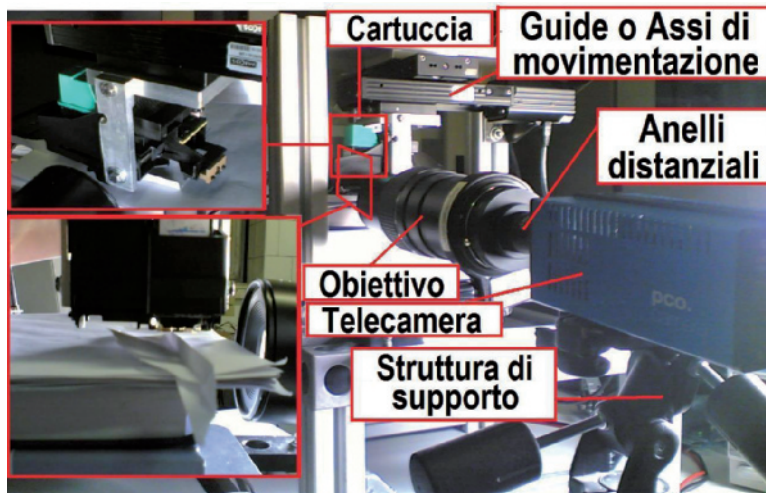


Fig. 4 - Dispositivo di acquisizione con telecamera ad alta velocità e obiettivo fotografico montato su guide micrometriche motorizzate

Fig. 5 - Dispositivo di acquisizione con telecamera ad alta velocità montata su microscopio ottico con guide motorizzate

tecnologia Drop on Demand (DoD) [5a] [5b], in quanto ha migliori caratteristiche per applicazioni nelle quali si vuole controllare la frequenza di deposizione di piccole quantità di collante su aree ristrette.

Funzionamento di una cartuccia a getto di inchiostro

Il processo inkjet è stato inventato già negli anni '80, ma non si è affermato subito (per come lo conosciamo oggi) a causa della limitata precisione e dell'elevato costo. Esistono due principali tecniche:

- getto d'inchiostro a caldo, con temperature di circa 400 °C agli ugelli;
- getto d'inchiostro a freddo ottenuto mediante l'utilizzo di materiali piezoelettrici.

Le stampanti inkjet commerciali, in funzione della casa produttrice, si distinguono pertanto in termiche e piezoelettriche. Nella stampante termica la testina è un attuttore formato da un minuscolo calorifero (Figura 2), che scalda l'inchiostro fino al suo punto di ebollizione, creando così una bolla di vapore che forza una goccia ad uscire attraverso l'ugello. A questo punto il calorifero si spegne e l'inchiostro si raffredda, ritornando allo stato iniziale. Nella stampante piezoelettrica la testina è un attuttore che utilizza uno speciale tipo di cristallo costituito da un elemento pie-

zoelettrico, il quale si deforma sotto l'influenza di un campo elettrico (Figura 2). Il movimento del cristallo, preme la camera contenente l'inchiostro che espelle una goccia attraverso un tubo capillare (l'ugello). Nel momento in cui la corrente si azzerava, il cristallo torna alla sua posizione di origine. Il problema della testina piezoelettrica è che essa è posta nella stampante, pertanto, se avviene un guasto, deve essere riparata l'intera stampante. Lo svantaggio delle stampanti termiche invece è che con ciascuna cartuccia sostituita si devono sostenere nuovamente i costi degli ugelli. In una stampante inkjet da ufficio, ciascun carattere viene memorizzato sotto forma di puntini in una matrice e in corrispondenza di ciascun puntino, attraverso l'azione combinata degli ugelli, viene spruzzata una gocciolina di inchiostro. Proporzionalmente rispetto al numero di ugelli presenti sulla testina e alla riduzione delle loro dimensioni, aumentano risoluzione e qualità di stampa. Si è passati da 21, 32, 48, 64 ugelli per ogni colore o per il nero, a centinaia di ugelli (e il loro numero è in costante crescita nei nuovi modelli di stampanti) presenti sulla medesima superficie.

I valori di tensione che sollecitano l'ugello per attivare la formazione di una goccia nella testina con frequenza di centinaia di Hz, vanno da 7 V a 16 V e nella testina presa in esame

(mod. HP51626A) il valore ottimale è intorno a 11 V. I 2 parametri elettrici principali che influenzano la formazione della goccia, come mostrato in Figura 3 sono:

- tensione di alimentazione del circuito,
- durata dell'impulso applicato alla resistenza termica (calorifero).

La durata dell'impulso deve rappresentare un compromesso tra riscaldare correttamente la resistenza senza correre il rischio di bruciarla.

Il sistema di acquisizione di immagini delle gocce

Per effettuare l'acquisizione delle immagini è stato necessario realizzare un dispositivo che riducesse al minimo le variabili che ne potessero influenzare l'elaborazione. La scelta è stata quella di poter controllare sia la posizione della telecamera che le condizioni di illuminazione. In una prima versione, il sistema rappresentato in Figura 4 era costituito da una struttura di supporto per il fissaggio di una telecamera con obiettivi fotografici ad elevato ingrandimento. I limiti erano dovuti ai movimenti relativi, seppur micrometrici, tra telecamera e cartuccia. Pertanto si è passati ad impiegare direttamente il supporto e l'ottica di un microscopio come mostrato in Figura 5.

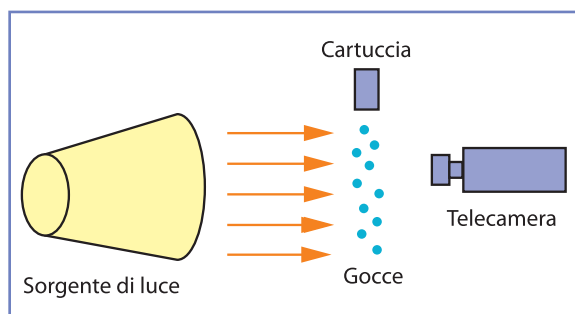


Fig. 6 - Tecnica di illuminazione in controluce

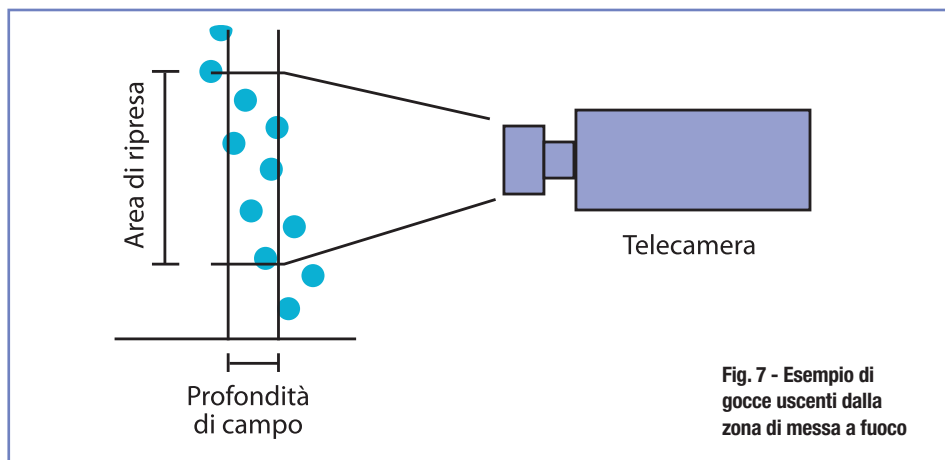


Fig. 7 - Esempio di
gocce uscenti dalla
zona di messa a fuoco

L'ingrandimento utilizzato è di 6.3x e l'illuminazione è stata realizzata con una lampada fotografica ad alta efficienza da 25W, utilizzando la tecnica in controluce (trattata nel paragrafo successivo).

Progettazione dei sistemi di illuminazione e ottico

La scelta dell'illuminazione è stata effettuata tramite diverse prove, per ottimizzare le prestazioni del sistema. Una buona illuminazione consente, infatti, di mettere bene in evidenza le caratteristiche dell'oggetto necessarie per l'identificazione e l'analisi e ridurre le elaborazioni delle immagini.

Le prime prove sono state svolte con il metodo a luce diffusa, illuminando l'oggetto indirettamente e diffondendo la luce nell'ambiente circostante. La telecamera ad alta velocità però richiede una quantità di luce molto elevata (per il ridotto tempo di esposizione dell'otturatore - un fotogramma ogni 500 μ s) che è difficile da ottenere con tale tecnica.

Si è adottato allora il metodo in controluce, in cui la telecamera è disposta frontalmente

rispetto alla sorgente di luce, come schematizzato in Figura 6; tale metodo è anche il più indicato in applicazioni dove le grandezze di interesse sono forme e contorni. In questo modo l'immagine ottenuta con la telecamera presenta sagome scure (le gocce di inchiostro) su uno sfondo chiaro, da cui possono essere tratte informazioni bidimensionali. Per la scelta dell'ottica i parametri più critici sono ingrandimento e profondità di campo.

Trattandosi di gocce di grandezza dell'ordine di qualche decina di micron è stato necessario cercare di ridurre al minimo l'area di ripresa, sfruttando inizialmente dei tubi di prolunga, di lunghezza tale da garantire un compromesso fra maggiore ingrandimento e buone condizioni di luce. Infatti, aumentando la lunghezza dei tubi e quindi l'ingrandimento, le condizioni di luce peggiorano, fino a diventare inaccettabili. La soluzione ottimale è stata individuata filmando una griglia di dimensione calibrata per valutare le dimensioni dell'area di ripresa. In base al sensore CCD presente nella telecamera e al formato di acquisizione

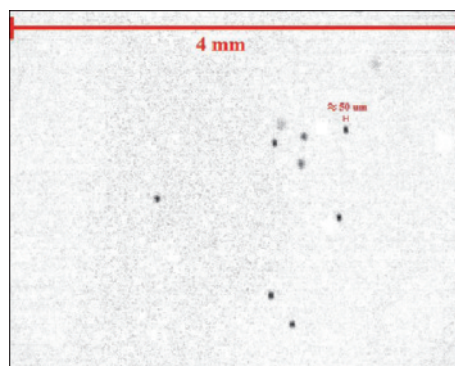


Fig. 8 - Immagine originale

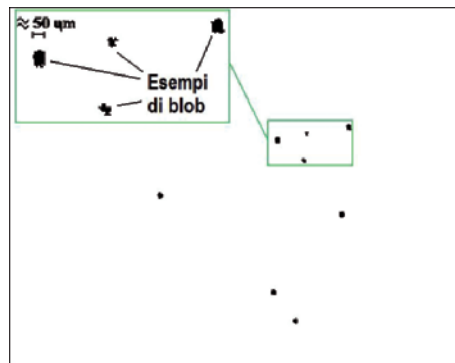


Fig. 9 - Immagine delle gocce elaborata (dopo eliminazione del rumore e binarizzazione)

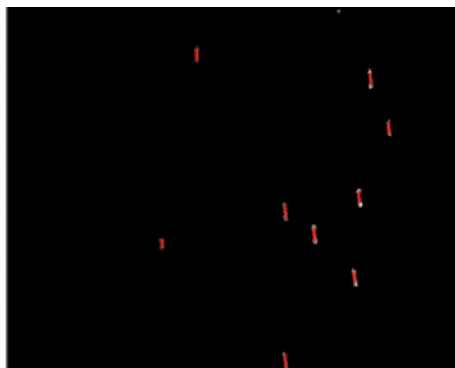


Fig. 10 - Mappa con le velocità delle gocce

(CCIR), l'area inquadrata ha un rapporto tra i lati di 4:3.

La profondità di campo è stata valutata controllando lo spostamento della telecamera tramite guide motorizzate micrometriche a ricircolo di sfere nella direzione dell'asse ottico e fissando la perdita di messa a fuoco nella dimensione di un pixel. Sono stati testati due obiettivi per telecamere industriali ed uno fotografico che ha fornito i risultati migliori. Con quest'ultimo si è ottenuta un'area minima visibile di appena 4 mm² (2,32 mm x 1,74 mm). I problemi maggiori sono stati però quelli di messa a fuoco poiché la profondità di campo risultante era

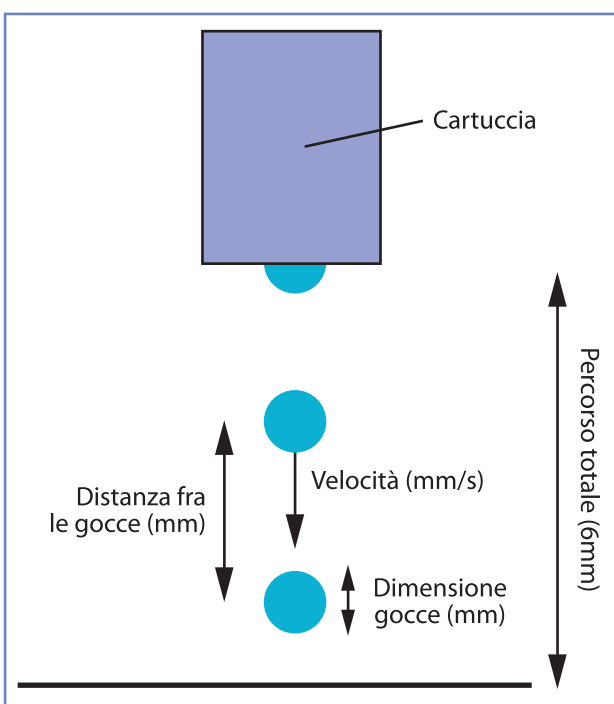


Fig. 11 - Grandezze da misurare

micrometrica. Come si può dedurre dallo schema di Figura 7, le gocce risultavano visibili soltanto per un brevissimo tempo (per pochi fotogrammi successivi) a causa del loro cammino non esattamente parallelo al piano di ripresa.

Il dispositivo di acquisizione è stato quindi realizzato sfruttando l'ottica di un microscopio come descritto in precedenza. Il dispositivo nella versione finale ha presentato una diminuzione dell'ingrandimento, con un'area di ripresa di circa 12 mm² (corrispondenti a 4 mm x 3 mm), ma un aumento della profondità di campo dell'ordine del decimo di millimetro, che permette di osservare a fuoco le gocce per buona parte del loro cammino.

Analisi delle immagini ad alta velocità ottenute

Nella fase di preprocessing, da ciascuna immagine acquisita dalla telecamera ad alta velocità è stato sottratto lo sfondo in modo da eliminare tutti i disturbi ricorrenti nelle immagini. Successivamente è stata effettuata una operazione morfologica di erosione in modo da eliminare i disturbi ancora presenti (visibili in Figura 8) e di dimensione inferiore a quella delle gocce. Per determinare le dimensioni e le forme

delle gocce è stata eseguita una binarizzazione delle immagini preelaborate (dopo sottrazione e erosione), ottenendo delle forme nere su sfondo bianco, dette blob. La binarizzazione consiste nell'assegnare livelli di bianco e nero, in funzione del livello di grigio rispetto ad una soglia tra 0 a 255. Il metodo di scelta della soglia era basato sull'istogramma delle frequenze dei livelli di grigio dei pixel dell'immagine. Il risultato è mostrato in Figura 9.

Dalle immagini binarie sono stati esaminati i blob: un blob è un'area formata da pixel con lo stesso stato logico, nel caso specifico il valore di intensità del pixel (nero). In particolare sono state determinate le coordinate del baricentro e il raggio in pixel di ciascuna goccia presente in ciascuna immagine della sequenza acquisita. Dalla misura in pixel è stata determinata direttamente quella in micron attraverso il coefficiente di calibrazione determinato in base alla risoluzione delle immagini (1280x1024 pixel) e corrispondente a circa 3,125 µm/pixel.

Per quanto riguarda la velocità è stata calcolata soltanto quella delle gocce presenti in coppie di fotogrammi consecutivi individuando i baricentri di tutte le gocce presenti nel primo fotogramma e a partire dalle loro coordinate, con un'istruzione condizionale, è stata constatata la presenza o meno delle stesse nell'immagine successiva. Verificata la corrispondenza tra due immagini della stessa goccia, è stato calcolato lo spazio percorso dai baricentri che, diviso per il periodo di acquisizione (i citati 500 µs), ha fornito la velocità delle corrispondenti gocce. In Figura 10 si ha un esempio di analisi di una coppia di immagini con il tracciamento dei vettori velocità (in rosso) di ogni goccia.

Risultati

L'obiettivo del lavoro è stato quello di misurare alcune grandezze caratteristiche delle gocce di inchiostro (forma e dimensioni, velocità e traiettoria ecc.) come schematizzato nella Figura 11. I parametri sono stati calcolati con un programma appositamente sviluppato. In Tabella 1 sono riportati alcuni parametri della sequenza descritta a titolo di esempio nelle figure precedenti.

In base ai dati delle 8 gocce di Figura 9, il raggio medio risulta pari a 27,8 µm, e la velocità media è di 5,8 cm/s.

Per calcolare la distanza media fra le gocce, è stato considerato che la frequenza di emissione è di 400 Hz, che corrisponde ad una goccia ogni 2,5 ms. Posto che la velocità media è di 5,8 cm/s, la distanza media trovata è di 145 µm. La misura diretta della distanza tra due gocce non risulta affidabile poiché, come mostrato in Figura 7, per la difficoltà di allineamento tra percorso delle gocce e area di messa a fuoco la maggior parte delle gocce esce dal fuoco.

Gli stessi calcoli mostrati su una immagine sono stati ripetuti su sei filmati di 2856 immagini ciascuno.

Tabella 1 - Raggio e velocità delle 8 gocce visibili in Figura 9

| Gocce | Raggio (µm) | Velocità (cm/s) |
|-------|-------------|-----------------|
| 1 | 28 | 5,2 |
| 2 | 28,8 | 5,4 |
| 3 | 31,7 | 5,9 |
| 4 | 26,5 | 6,2 |
| 5 | 27,7 | 6,2 |
| 6 | 19,6 | 5,9 |
| 7 | 29,1 | 5,4 |
| 8 | 31,3 | 6,1 |

La Figura 12 mostra gli istogrammi del raggio e delle velocità calcolati su uno di questi filmati.

Osservando gli istogrammi si può vedere che i calcoli sono stati effettuati su oltre 2200 gocce per il raggio e oltre 800 gocce per la velocità. Considerando che gli stessi calcoli sono stati ripetuti anche per gli altri filmati, ottenendo circa i medesimi risultati, si può quindi ritenere che i dati trovati sono consistenti. Per quanto riguarda la forma, la regolarità (sfericità) delle gocce dipende dal prodotto della tensione di alimentazione per la durata di sollecitazione del calorifero. In Tabella 3 vengono riportati i risultati delle prove per 3 diversi livelli di tensione al variare della durata dell'impulso.

Metodi alternativi per la stima delle dimensioni delle gocce

Per calcolare il volume di inchiostro di una singola goccia si è fatto uso di due bilance elettroniche (Figura 13) aventi risoluzione del centesimo e del millesimo di grammo. In ciascuna prova si è tenuto conto dell'evaporazione del liquido, confrontando il peso della cartuccia, con quello dell'inchiostro che progressivamente si depositava su una piastra (piastra di Petri).

Ogni prova è durata 10 minuti, durante i quali, come si evince dalla Tabella 1, si è constatato che la diminuzione di peso della cartuccia sia, in media, circa 45 mg (ultima colonna). Sapendo che la cartuccia viene pilotata con un segnale a 400 Hz cui corrisponde un'emissione di 240.000 gocce durante i 10 minuti, si ricava che la singola gocciolina ha un peso di circa 187,5 ng.

Il volume della singola goccia, stimando la densità dell'inchiostro pari a 1.010 g/ml³, è quindi di circa 185 pl. Infine, approssimando

la forma delle gocce a sferica si desume che esse hanno un raggio medio di 35 µm.

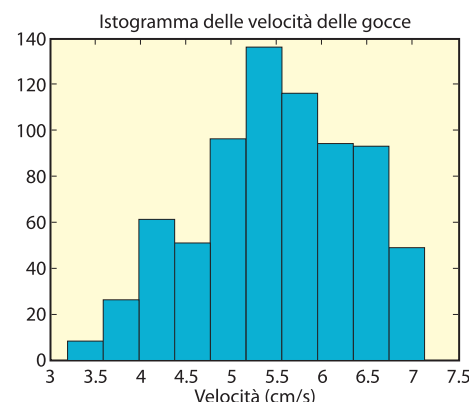
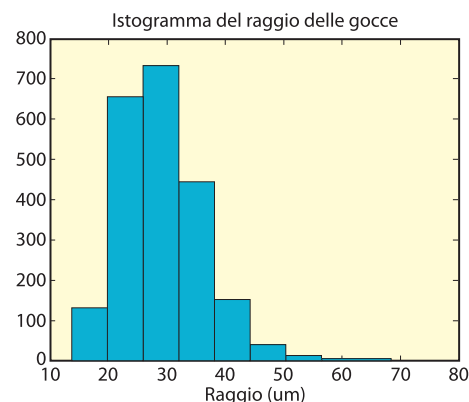
Valutando la Tabella 1 si può inoltre quantificare il livello di evaporazione del liquido nell'ordine di 0,4 mg nell'arco di 24 ore a temperatura ambiente. Le stime sono soggette ad errori dovuti alla combinazione di diversi fattori contrastanti quali composizione dell'inchiostro, condizioni ambientali ecc.

Secondo un terzo metodo di stima, nelle condizioni ottimali determinate pari a 11 V di tensione e 5 µs di durata dell'impulso applicato al calorifero, il raggio delle gocce stampate su carta è risultato tra 50 e 55 µm; mentre viceversa la dimensione delle gocce spruzzate su una superficie non assorbente (alluminio lucidato) è compreso tra 35 e 40 µm, coerentemente con i metodi precedenti.

Conclusioni

Le maggiori difficoltà di questo progetto sono state incontrate nel determinare l'obiettivo che avesse un buon compromesso fra ingrandimento e profondità di campo, per

Fig. 12 - Istogramma con la distribuzione del raggio e della velocità delle gocce valutati in una sequenza di 2856 immagini



ottenere immagini sulle quali si potessero effettuare le misure. È stato scelto di installare una telecamera ad alta velocità su microscopio ottico, che ha permesso una buona profondità di campo, mantenendo comunque un ingrandimento adeguato per l'applicazione.

I risultati ottenuti con il sistema di acquisizione di immagini ad alta velocità relativa-

Tabella 2 - Peso della cartuccia (c) e della piastra(p) in grammi [g] in funzione della tensione in Volt [V] applicata. I valori negativi indicano l'evaporazione

| Prova (10 min) | Prima (c) | Dopo (c) | Δg |
|-------------------|-----------|----------|---------|
| | Prima (p) | Dopo (p) | |
| [13.4-13.7]V | 56.722 | 56.680 | - 0.042 |
| | 1.405 | 1.445 | +0.040 |
| [13.3-13.5]V | 56.575 | 56.537 | - 0.038 |
| | 1.404 | 1.442 | +0.038 |
| [13.3-13.5]V | 56.530 | 56.485 | - 0.045 |
| | 1.520 | 1.562 | +0.042 |
| [13.3-13.5]V | 56.456 | 56.404 | - 0.052 |
| | 1.289 | 1.327 | +0.038 |
| [13.3-13.5]V | 56.404 | 56.357 | - 0.047 |
| | 1.284 | 1.322 | + 0.038 |

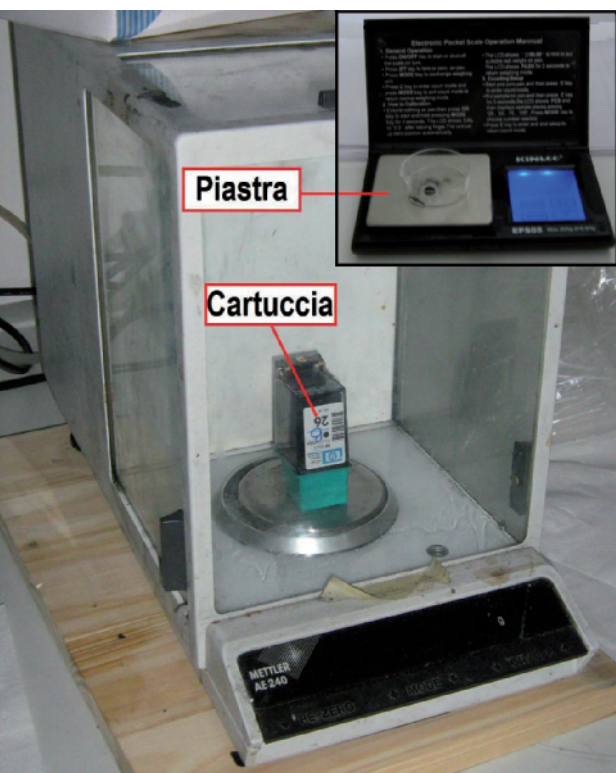


Fig. 13 - Pesatura della cartuccia (evaporazione) e dell'inchiostro spruzzato durante il funzionamento, nel riquadro

mente alle dimensioni delle gocce in volo sono dello stesso ordine di grandezza di quelli forniti tramite pesatura con bilance elettroniche o dopo l'impatto. Pertanto il dispositivo si può considerare validato anche per gli altri parametri misurati (velocità e distanza). La precisione sulle misure ottenute è sufficiente per gli scopi dell'applicazione.

Questi dati sono necessari per impostare i parametri su un sistema di prototipazione rapida basato sulla tecnica 3DPrinting in corso di sviluppo presso il laboratorio.

Ringraziamenti

Il progetto descritto è stato sviluppato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa dagli studenti Antonio Vigna e Daniele Meucci nell'ambito dell'insegnamento di Automazione dei Processi Produttivi del Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione anno accademico 2008-09. La caratterizzazione non visuale della testina è stata eseguita dallo studente Alessandro Chiochetti nell'ambito della tesi di laurea specialistica in Ingegneria dell'Automazione. Gli autori ringraziano il prof. Giovanni Tantussi e i tecnici Flavio Antonelli e Gabriele Moretti del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione per il supporto nello sviluppo dell'attrezzatura.

Bibliografia

- [1] Heilmann J., Lindqvist U.; 2000; Effect of drop size on the print quality in continuous ink jet printing, The Journal of imaging science and technology; 44/6:491-494
- [2] T. M. Liou, K. C. Shih, S. W. Chau and S. C. Chen; 2002; Three-dimensional simulations of the droplet formation during the inkjet printing process; International Communications in Heat and Mass Transfer; 29/1109-1118
- [3a] Sachs et al; 1993; Three-dimensional printing techniques; United States Patent 5,204,055
- [3b] Sachs E., Haggerty J., Cima M., Williams P.; 1994; Three dimensional Printing Techniques; United States Patent 5,340,656
- [4] Duineveld P.C., Shubert U.S., de Gans B.-J.; 2004; Inkjet printing of polymers; State of the art end future developments; Advanced Materials, 16
- [5a] Lanzetta, M.; Sachs, E.: The Line Formation with Alumina Powders in Drop on Demand Three Dimensional Printing, PRIME 2001, 189-196
- [5b] Lanzetta, M.; Sachs, E.: Optimization of the Line Quality with Dry Powders in Three Dimensional Printing, PRIME 2001, 197-204
- [6] Agui T., Nakajima M.; 1977; Drop formation characteristics of electrostatic inkjet using water-based ink; IEEE Transactions on Electron Devices, 24, 262-266
- [7] P. Baker JR; 1997; Three dimensional printing with fine metal powders; Master of Science in mechanical engineering, Massachusetts Institute of Technology
- [8] Lanzetta, M.; Sachs, E.: Improved Surface Finish in 3D Printing Using Bimodal Powder Distribution, Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, n. 3, 2003, pp. 157-166

Tabella 3 - Valutazione qualitativa al microscopio ottico della forma di gocce nella stampa su carta di linee da una distanza di 6 mm, in funzione di tensione e durata dell'impulso applicati al calorifero della testina inkjet

| Tensione [V] | Durata [μs] | Osservazioni |
|--------------|-------------|---|
| 7 | <25 | Assenza di gocce |
| | 25 | Debole sollecitazione dell'ugello, gocce sporadiche e di forma variabile |
| | 32 | Gocce di dimensioni variabili e con numerosi satelliti |
| 11 | ≤3 | Assenza di gocce |
| | 4 | Gocce di forma non regolare |
| | 5 | Gocce regolari (sferiche) perfettamente equidistanziate |
| | 8 | |
| | ≥12 | Gocce di dimensioni variabili e con vistosi satelliti |
| 14 | 2 | Gocce regolari (sferiche) equidistanziate con contorno perfettamente definito |
| | 5 | |
| | 6 | |
| | ≥12 | Gocce con contorno sfumato e qualche satellite più grande |